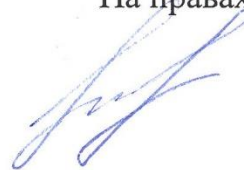


На правах рукописи



ВЕРНИГОРА ЛЮДМИЛА ВИТАЛЬЕВНА

**РАЗРАБОТКА СХЕМ ЛОКАЛИЗАЦИИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ  
АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ МАЯКОВ**

Специальность 05.13.01 – системный анализ, управление  
и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая техника)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2018

Работа выполнена на кафедре 604 «Системный анализ и управление» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

**Научный руководитель:** **Пичхадзе Константин Михайлович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры 604 «Системный анализ и управление» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

**Официальные оппоненты:** **Муртазов Андрей Константинович**

доктор технических наук, доцент, директор обсерватории ФГБОУ ВО «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина»

**Прохоров Михаил Евгеньевич**

доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией космических проектов государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ

**Ведущая организация:** **Казанский федеральный университет**

Защита состоится 29 ноября 2018 года в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Московского авиационного института (национального исследовательского университета) и на сайте: [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=96104](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=96104)

Отзывы, заверенные печатью, просим выслать по адресу: Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.125.12

к.т.н., доцент

  
Старков А.В.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Важной частью функционирования любой космической экспедиции является определение местоположения космического аппарата (КА) и его состояния с помощью наземных и космических средств.

Однако несмотря на высокую эффективность радиотехнических и оптических систем наблюдения возрастающие требования к точности и оперативности определения координат КА, а также их состояния приводят к необходимости усовершенствования имеющихся методов и разработке новых.

Появление новых высокоэффективных (КПД до 80%) полупроводниковых источников света с большими сроками службы (более 100 000 часов), высокими удельными мощностными характеристиками, полосой излучения в широком диапазоне длин волн и разнообразными схемами управления позволяет использовать такие полупроводниковые источники света для создания оптических маяков для автоматических космических аппаратов.

Актуальность данной диссертационной работы обусловлена необходимостью:

- определения местоположения лунных посадочных станций относительно центра масс Луны и создания долгоживущих реперов для построения сетки селенодезических координат высокой точности;
- создания оптических маяков для последующих лунных экспедиций;
- создания автономного индикатора состояния околоземных космических аппаратов.

### **Цель работы**

Целью работы является разработка схем локализации и идентификации автоматических космических аппаратов с использованием оптических лазерных маяков.

### **Задача исследования**

Провести анализ применения оптических лазерных маяков для космических аппаратов и разработать схемы оптической информационной системы высокоточного определения местоположения лунных посадочных станций и околоземных КА.

### **Объект исследования**

Космические аппараты с бортовыми оптическими лазерными маяками.

### **Научная новизна**

- Разработана схема определения местоположения лунной посадочной станции с оптическим лазерным маяком с помощью бортовой телекамеры орбитального аппарата, которая позволит впервые сделать привязку координат маяка к звездам и центру масс Луны и использовать его в качестве астропункта для построения сетки селенодезических координат высокой точности.

- Разработана конструкция оптических лазерных маяков для лунных посадочных станций «Луна-Глоб»/ «Луна-Ресурс-1» с учетом особенностей посадочных станций.
- Разработана математическая модель вычисления времени видимости автономных оптических лазерных маяков на борту околоземных КА с помощью наземных оптических средств наблюдения.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

- Анализ применения оптических маяков на основе лазерных диодов для локализации и идентификации лунных и околоземных КА.
- Схема определения местоположения лунной посадочной станции с оптическим лазерным маяком с помощью бортовой телекамеры орбитального аппарата, которая позволит впервые сделать привязку координат маяка к звездам и центру масс Луны и использовать его в качестве астропункта для построения сетки селенодезических координат высокой точности.
- Основные параметры оптических лазерных маяков для лунных посадочных станций «Луна-Глоб»/ «Луна-Ресурс-1».
- Математическая модель вычисления времени видимости оптических лазерных маяков на борту околоземных КА с помощью наземных оптических средств наблюдения.

### **Методы исследования**

Методы исследования в работе базируются на расчетных и экспериментальных методах.

### **Практическая значимость работы**

Исследования по теме диссертации связаны с решением практических задач, стоящих в космической технике и связанных с созданием новых средств навигации космических аппаратов. Результаты работы используются в ОКР «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс-1».

### **Личный вклад автора**

Основные результаты являются оригинальными и получены либо автором, либо при его непосредственном участии.

Автором выполнено следующее:

- участие в разработке концепции создания и применения оптических лазерных маяков для определения местоположения лунных посадочных станций с помощью бортовой телекамеры орбитального аппарата;
- участие в разработке ТЗ на оптические маяки для миссий «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс-1» и участие в испытаниях маяков;
- разработка схемы определения координат и состояния бортового комплекса управления КА, которая заключается в размещении автономных оптических

лазерных маяков на борту КА;

- разработка математической модели вычисления времени видимости автономных оптических лазерных маяков на борту околоземных КА с помощью наземных оптических средств наблюдения.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- независимыми методами расчетов характеристик оптических маяков;
- экспериментальными исследованиями характеристик оптических лазерных маяков проектов «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс-1».

### **Апробация работы**

Основные результаты были получены в ходе выполнения государственного контракта №ПЗ88 от 27.05.2010 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.» проекта «Разработка высокоэффективных лазерных технологий изготовления изделий космической техники» и изложены в соответствующих отчетах.

Результаты, полученные автором, докладывались на ряде международных конференций:

XXXV, XXXVI, XXXVIII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства, г. Химки (2011 г., 2012 г., 2014 г.).

48-е НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ памяти К.Э. Циолковского «Автономные световые индикаторы состояния космических комплексов научного и прикладного назначения», г. Калуга (2013 г.);

Международная астрономическая конференция «The Moon, moons & planets: Robotic Explorations» (ASTROKAZAN – 2011), г. Казань (2011г.)

VI Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», г. Москва (2013 г.).

71-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, г. Москва (2016 г.).

По материалам диссертации автором были сделаны доклады на семинарах и получены положительные отзывы в следующих организациях:

- Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ) (2015 г.).
- ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (2016 г.).
- Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК) (2016 г.).

## Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 75 наименований, изложена на 142 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунка и 5 таблиц.

### *СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ*

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задача исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

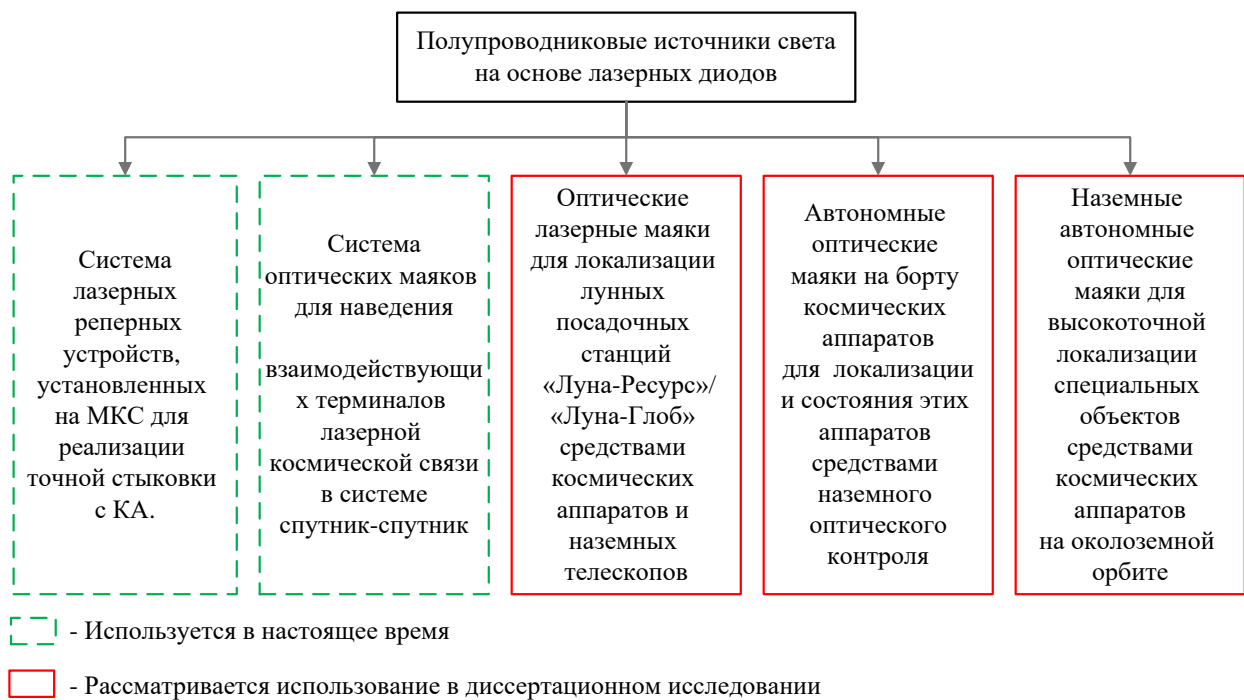
В **первой главе** проведен анализ методов высокоточного определения координат космических аппаратов, включая планетные станции. К таким методам относятся: радиотехнические методы, в том числе с применением радиоинтерферометра, оптические методы и метод лазерной дальнометрии.

Несмотря на высокую эффективность радиотехнических и оптических систем наблюдения применение оптических маяков позволит увеличить точность измерения и повысить надежность определения координат лунных и околоземных КА.

Использование искусственных источников света позволит улучшить применение оптических средств наблюдения космических аппаратов. Еще в 60-е годы XX века, когда только отрабатывались методы космической геодезии и еще не были разработаны методы высокоточной лазерной локации КА, возникла потребность в бортовых импульсных источниках света. Системой импульсной световой сигнализации с мощной лампой-вспышкой были оснащены космические аппараты типа «Сфера» и «Муссон», которая позволяла проводить космические геодезические измерения. В систему импульсной световой сигнализации входила хорошо теперь известная, а тогда еще редкая ксеноновая лампа. Импульсная лампа обеспечивала заметность КА на фоне звездного неба. Такая световая сигнализация позволяла определять положение космического аппарата относительно звезд с погрешностью 3-6 угловых секунд. Современные оптические средства наблюдений за объектами в околоземном космическом пространстве (ОКП) используют в качестве приемников оптического излучения приборы с зарядовой связью (ПЗС-матрицы), которые имеют чрезвычайно высокую чувствительность и линейное разрешение в несколько раз более высокое, чем имели лучшие «астрономические» фотоэмульсии.

Проведен сравнительный анализ газоразрядных и полупроводниковых источников излучения.

Проведен анализ возможности использования полупроводниковых источников света на основе лазерных диодов для КА, который показывает следующие области их применения (рисунок 1).



*Рисунок 1. Области применения полупроводниковых источников света для КА*

В настоящее время эти источники применяются: для точного определения относительного положения КА и международной космической станцией (МКС) при стыковке. Аналогичные лазерные локационные системы также применяются в системах беспроводной передачи энергии между КА для точного наведения лазерного канала на приемник излучения КА-потребителя и в системах межбортовой передачи информации на основе лазерной связи.

На сегодняшний день применение этих источников на этом ограничивается, тогда как возможности их намного шире. В данной работе рассмотрены более широкие возможности применения оптических лазерных маяков для КА.

В первую очередь это оптические лазерные маяки, установленные на посадочных планетных станциях, таких как «Луна-Глоб»/ «Луна-Ресурс-1» Установка этих маяков позволит локализовать местоположение посадочных станций с высокой точностью с помощью оптических телевизионных средств космических аппаратов и наземных станций наблюдения. Научное значение оптических маяков будет заключаться в фиксации на них системы планетоцентрических координат, жестко определенной на поверхности планеты. В дальнейшем оптические лазерные маяки будут использованы как элементы управления посадкой в выбранной точке поверхности для последующих лунных экспедиций.

Оптические измерения способны обеспечить точность более высокую, чем при использовании радиодиапазона. Установка автономных оптических лазерных маяков на борту околоземных КА позволит позиционировать КА на орбите с использованием пассивных наземных оптических средств контроля как работающих, так и утративших работоспособность КА независимо от их размеров и типа орбиты. Система оптического контроля при установке интерференционных

фильтров на наземные телескопы позволит: вести наблюдения КА с бортовыми оптическими лазерными маяками даже в дневное время (при высокой яркости фоновой подсветки), а при использовании кодировки световых импульсов оптического маяка: определять угловые координаты КА; определять состояние КА (идентифицировать аварийные варианты); контролировать такие фрагменты космических систем с установленными на них маяками, как космический мусор.

В качестве третьей задачи интерес представляет использование наземных автономных оптических лазерных маяков в системе измерения геодезических координат прецизионной точности. При использовании космического оптического интерферометра ОЗИРИС может быть достигнута миллиметровая точность определения местоположения маяков.

Разработан алгоритм выбора основных проектных параметров источника излучения для оптического маяка на борту КА.

С учетом предъявляемых проектных требований к источнику излучения для маяка на борту КА (рисунок 2) проведен анализ современных полупроводниковых источников излучения, который показывает, что наиболее приемлемым является лазерный диод, излучающий в области 800-900 нм.

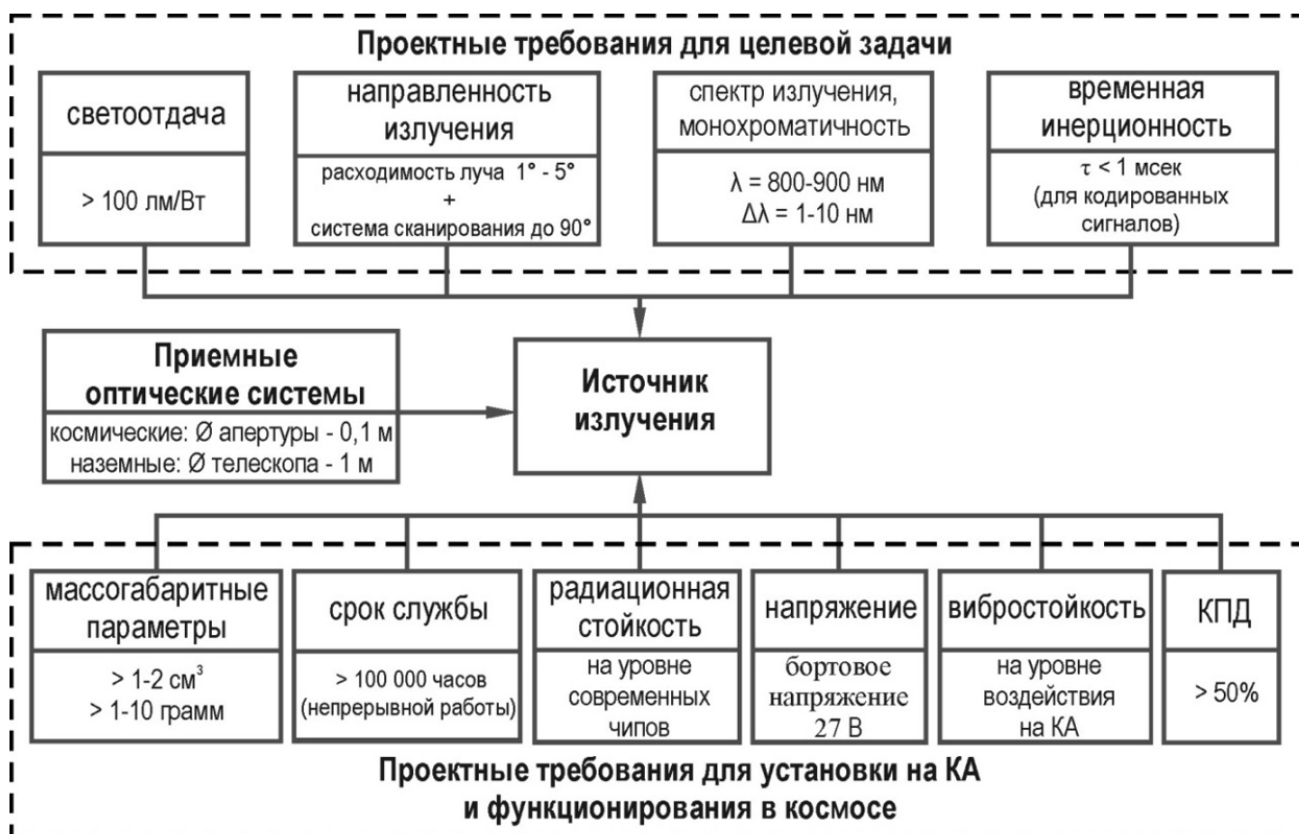


Рисунок 2. Схема использования оптических лазерных маяков для КА

Во **второй** главе рассмотрено использование оптических лазерных маяков для локализации лунной посадочной станции с помощью оптических средств орбитального аппарата.



Район посадки посадочных станций «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс-1», определенный по баллистическим расчетам, может быть задан с точностью в несколько километров. После спуска лунная посадочная станция в силу малости своих геометрических размеров не может быть обнаружена сразу бортовыми телекамерами орбитального аппарата (ОА), и ее положение не может быть уточнено без привлечения дополнительных средств. На посадочных станциях «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс-1» в качестве такого дополнительного средства навигации устанавливается оптический маяк на основе лазерных диодов, который будет обнаружен бортовой телекамерой ОА по признаку существенного превышения светового потока над уровнем фоновой засветки. Расположение оптического лазерного маяка относительно деталей окружающей поверхности будет зафиксировано с точностью, соответствующей пространственному разрешению бортовой телекамеры, хотя собственный размер светящегося тела источника света маяка составляет не более 2x2 мм.

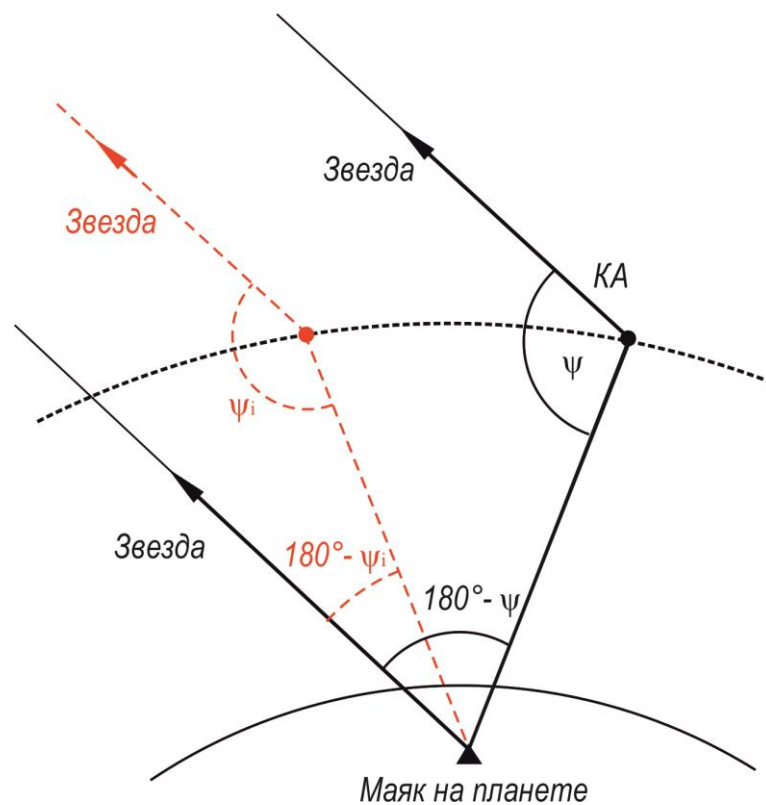
Представлена схема расчета характеристик оптического лазерного маяка на посадочной станции в зависимости от высоты орбиты и параметров телевизионной аппаратуры ОА на примере использования ТВ МСУ-205 для регистрации маяка с высоты 200 км.

Точность получаемых координат оптического лазерного маяка зависит от точности определения ориентации ОА по звездам, от разрешающей способности бортовой ТВ-камеры и высоты орбиты спутника. В миссии «Луна-Ресурс-1» при угловой точности бортовых датчиков ориентации 6" и угловом разрешении бортовой телекамеры 6"/пиксель на высоте орбиты 200 км точность определения координат оптического лазерного маяка соответствует ошибке по положению 6 м.

Представлены принципы применения оптических лазерных маяков для определения местоположения посадочных станций с помощью бортовой телекамеры орбитального аппарата.

На Земле высокая точность определения координат обеспечивается астрономическими наблюдениями. Координаты астропунктов измерены с точностью до сантиметра, на них и основана система геодезических координат. Координаты всех других точек на нашей планете определяются в этой системе координат. На Луне астропунктов нет. Самая маленькая деталь лунного рельефа, различимая в телескоп, имеет размер около километра. Поэтому и вся система селенодезических координат имеет километровую точность в центре лунного диска, и в несколько раз хуже – на его краях.

Вместо астропунктов на поверхности Луны можно разместить оптические лазерные маяки точечных размеров. Угол «маяк-КА-звезда» отличается от угла «КА-маяк-звезда» точно на 180° (рисунок 3).



*Рисунок 3. Принципы определения положения оптических маяков на поверхности планеты*

Проведение измерений с борта КА углов между направлениями на маяк и на звезды позволит одним прибором провести измерения по всей сфере, исключить систематические ошибки и сформировать высокоточную систему планетоцентрических координат.

Связь орбитальных параметров ОА и взаимного положения оптического маяка достигается методами уравнивания большого массива наблюдений.

Представлен алгоритм определения местоположения лунных посадочных станций с помощью оптических лазерных маяков и бортовой телекамеры орбитального аппарата.

Центр прямоугольной системы координат относится к центру масс Луны.

Положение спутника в момент измерений задается значениями прямоугольных координат  $\{X_c, Y_c, Z_c\}$ , однозначно связанных с параметрами орбиты и временем.

В момент измерений бортовые звездные датчики фиксируют ориентацию КА относительно звезд с координатами  $\{\alpha_i, \delta_i\}$ , то есть определяются направление оси визирования бортовой телекамеры и углы «центр масс Луны – спутник – звезда».

По измерениям положения изображения маяка в кадре вычисляются углы «маяк – спутник – звезда» (рисунок 4).

Угол «маяк – спутник – звезда» ( $\psi_k$ ):

$$\psi_k = \arccos\left(\frac{\bar{c} \cdot \bar{d}}{|\bar{c}| |\bar{d}|}\right) = \arccos\left(\frac{X_{M1}X_3 + Y_{M1}Y_3 + Z_{M1}Z_3}{\sqrt{X_{M1}^2 + Y_{M1}^2 + Z_{M1}^2} \sqrt{X_3^2 + Y_3^2 + Z_3^2}}\right)$$

где  $\bar{c} = \begin{pmatrix} X_{M1} \\ Y_{M1} \\ Z_{M1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_M - X_c \\ Y_M - Y_c \\ Z_M - Z_c \end{pmatrix}$  - вектор из спутника в маяк с координатами  $(X_M, Y_M, Z_M)$ ;

$\bar{d} = \begin{pmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{pmatrix}$  - вектор из спутника на звезду.

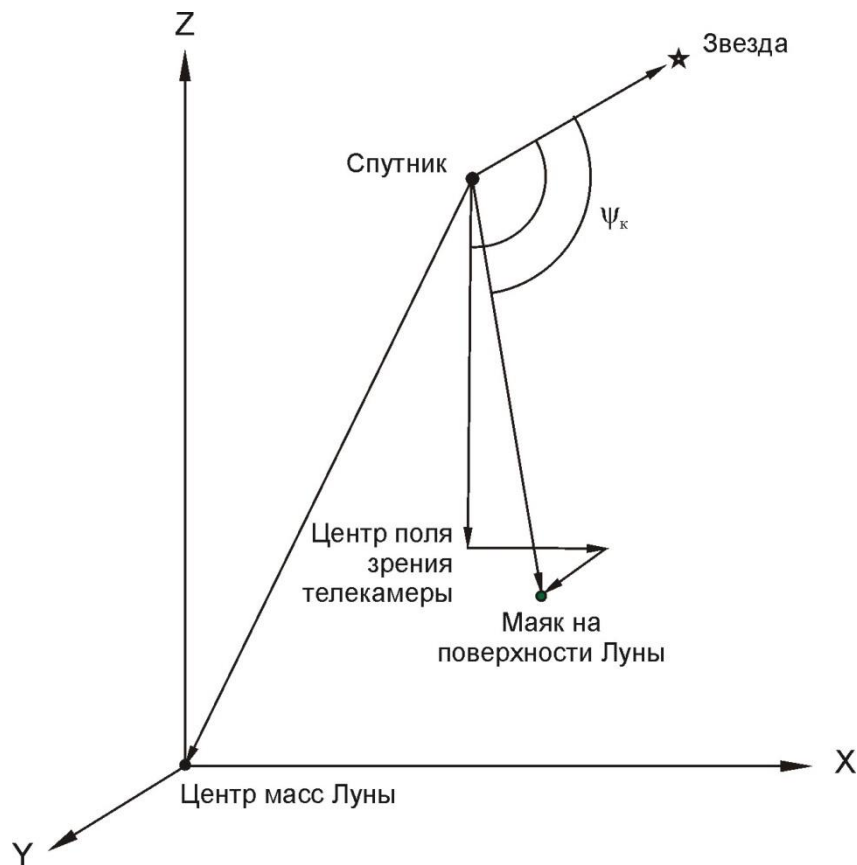


Рисунок 4. Схема определения положения маяка на поверхности Луны относительно звезды

Каждый измеренный угол является функцией небесных координат звезды, селенодезических координат маяка и прямоугольных координат спутника в системе прямоугольных координат с центром в центре масс Луны:  $\psi_k = \psi_k(X_M, Y_M, Z_M, \alpha_i, \delta_i, X, Y, Z, UTC)$ , где  $UTC$  – момент времени в шкале всемирного времени. Каждое измеренное значение  $\psi_k$  зависит от неизвестных параметров орбиты  $\{a, e, i, \Omega, \omega\}$ , определяемых координат  $(\varphi, \lambda, H)$  и известных величин  $(UTC, \alpha_i, \delta_i)$ . При длительных сериях измерений положений реперных точек лунной поверхности получаем избыточное число связывающих их

уравнений, которые решаются методами геодезического уравнивания. Алгоритм и программное обеспечение уравнивания данных (снимков), включающего расчетные величины селенодезических координат разрабатываются организацией МИИГАиК (автор участвовал в разработке ТЗ). Российской геодезии принадлежит первое место в передовой науке по обработке измерений со спутников Земли, а Казанский федеральный институт в области исследования Луны.

Представлена методика измерения координат посадочных станций «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс-1».

В рамках ОКР «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс-1» созданы оптические лазерные маяки для лунных посадочных станций.

Система оптических маяков, устанавливаемая на борту КА «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс-1», позволит обнаружить посадочные станции на поверхности Луны средствами телевизионной техники ОА и наземными оптическими телескопами, а также обеспечит высокоточную координатную привязку места проведения лунного эксперимента.

Один световод выводится в верхнюю часть приборного отсека и излучает в направлении траектории орбитального аппарата на лунном небосводе. Когда в поле зрения ТВ-камеры ОА попадает посадочная станция, то излучение от оптического маяка должно быть направлено на ОА. В этом случае камера ОА зафиксирует существенное превышение светового потока над уровнем фона и таким образом определит местоположение оптического маяка. Основные технические характеристики оптического лазерного маяка для связи с ОА представлены в таблице 1.

*Таблица 1. Основные технические характеристики оптического лазерного маяка для связи с ОА*

<b>Характеристика изделия</b>	<b>Параметр</b>
Облученность, создаваемая на объективе ТВ камеры ОА, Вт/м <sup>2</sup> *)	0,6 x 10 <sup>-9</sup>
Угол сектора облучения, град	25°
Длина волны излучения, мкм	0,4 – 0,9
Отклонение оси диаграммы направленности излучения от местной вертикали, град	10, не более
Режим излучения	непрерывный
Потребляемая электрическая мощность, не более, Вт	25
Напряжение питания, В	27

*\* Облученность, создаваемая на объективе ТВ-камеры ОА, равная 0,6x10<sup>-9</sup> Вт/м<sup>2</sup>, соответствует оптической мощности светового потока в 6 Вт в телесном угле 25°.*

Другой световод выводится параллельно относительно направленной антенны (НА), что обеспечит направление излучения оптического лазерного маяка точно по направлению НА, т.е. в сторону Земли. На Земле излучение маяка будут принимать оптические телескопы системы оптического наблюдения (СОН). Наземный

оптический телескоп, расположенный в одном районе с наземным пунктом радиосвязи, получит достаточно сильный световой поток, чтобы его регистрация была уверенной. Основные технические характеристики оптического лазерного маяка для регистрации наземным телескопом представлены в таблице 2.

*Таблица 2. Основные технические характеристики оптического маяка для регистрации наземным телескопом*

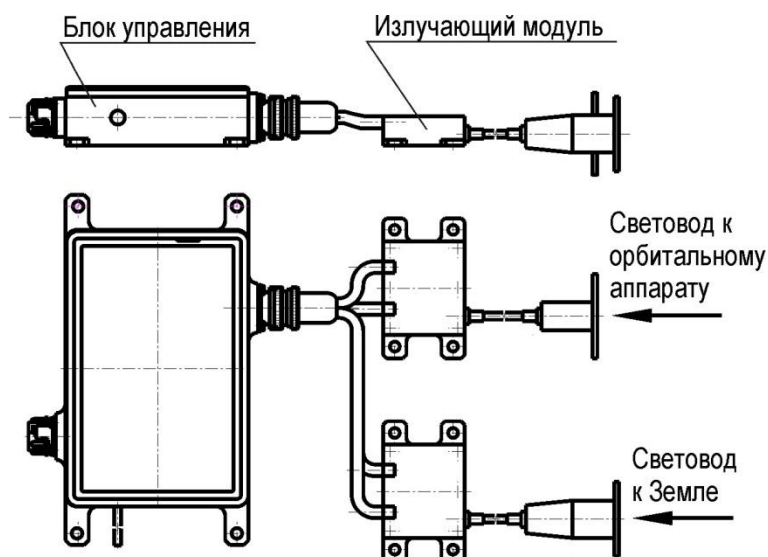
Характеристика изделия	Параметр
Облученность, создаваемая на телескопе, Вт/м <sup>2</sup> *)	0,4 x 10 <sup>-8</sup>
Угол сектора облучения, град	5°
Длина волны лазерного излучения, мкм	0,4 – 1,2
Режим излучения	Импульсно-периодический
Напряжение питания, В	27

*\* Облученность в 0,4x10<sup>-8</sup> Вт/м<sup>2</sup>, создаваемая на телескопе, соответствует оптической мощности светового потока в 2 Вт в телесном угле 5°.*

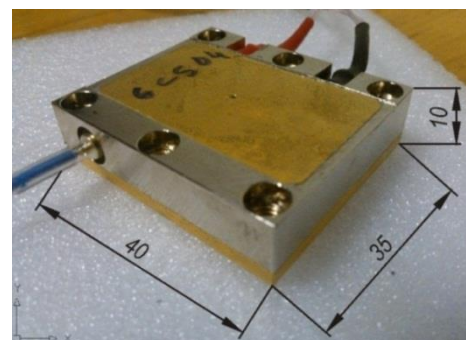
Поскольку место посадки КА определено вблизи лунного полюса, этот оптический лазерный маяк будет светить в плоскости лунного горизонта. При наблюдении через телескоп на Земле лазерный свет от включенного маяка будет виден на краю лунного диска рядом со звездами. Это позволит измерить точное положение оптического лазерного маяка относительно звезд, в результате чего будут независимым способом определены координаты посадочного модуля.

В дальнейшем система оптических лазерных маяков на борту посадочных станций «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс-1» будет использована и для других научных и служебных задач. Такие оптические лазерные маяки на поверхности Луны будут первыми в истории реперами с собственным размером в доли сантиметра, к которым может быть привязана сетка селенодезических координат высокой точности. А для последующих лунных экспедиций оптические лазерные маяки будут использованы как элементы управления посадкой в выбранной точке поверхности. Конечно, при этом необходимо подсоединить их к радиоизотопному источнику станции.

При участии автора диссертации в организации ЦКБ ИУС разработана и изготовлена конструкция оптического лазерного маяка для посадочных станций «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс-1» (рисунок 5).



*Сборка оптического лазерного маяка*



*Внешний вид излучающего модуля оптического лазерного маяка*

*Рисунок 5. Оптический лазерный маяк для посадочных станций «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс-1»*

Комплекс оптических лазерных маяков прошел весь комплекс автономных испытаний, которые подтвердили все необходимые оптические характеристики для работы на поверхности Луны.

Также проведена оценка эффективности совместного использования оптических маяков и радиомаяка, которая повысит точность навигационной космической задачи по определению координат посадочной станции на Луне.

В **третьей главе** рассмотрены автономные оптические лазерные маяки на борту околоземных КА которые позволят решить следующие задачи:

- рациональное размещение оптических маяков на КА позволит определить координаты и параметры ориентации КА из наблюдений пассивными наземными оптическими средствами;
- наблюдения КА оптическими средствами контроля ОКП независимо от размеров КА и типа его орбиты;
- независимый индикатор работоспособности космического аппарата;
- взаимное положение КА в орбитальных группировках.

В случае нештатных ситуаций аппараты на околоземных орбитах контролировать крайне сложно. Если в результате потери ориентации КА связь с ним отсутствует, чрезвычайно важно в самое короткое время установить ориентацию аппарата и определить моменты времени, когда радиантенна ориентирована на Землю и КА может принимать управляющие команды. Наземные фотометрические измерения позволяют проводить такую работу, но получение необходимого для этого наблюдаемого материала требует много времени.

Оперативный контроль ориентации КА может быть гарантирован при проведении оптических наблюдений, если на борту КА установить оптический маяк автономного действия.

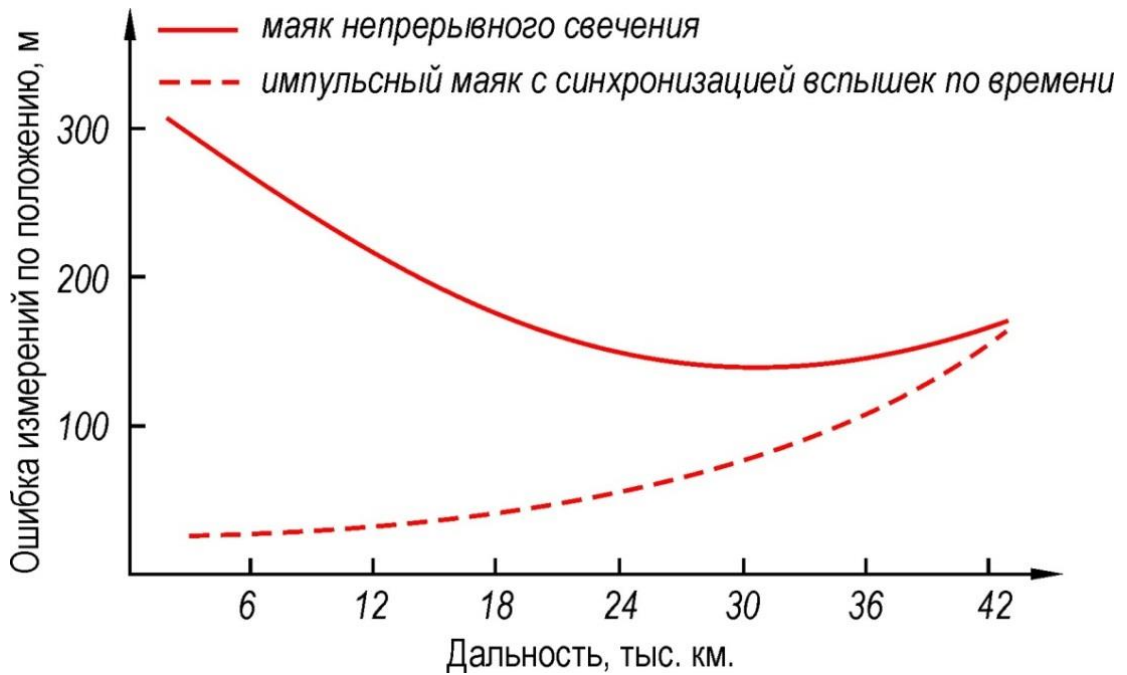
Для малоразмерных аппаратов их наземные наблюдения могут оказаться трудноосуществимыми и очень ненадежными. Малоразмерные цели неуверенно контролируются радиолокаторами, и они имеют очень низкую видимую яркость, что затрудняет их наблюдение оптическими средствами. Кроме того, существуют специализированные спутники, которые находятся на неудобных для оптических наблюдений орбитах, например, на солнечно-синхронной, когда спутник можно наблюдать только во время сумерек и при неблагоприятной фазе, его наблюдения в оптическом диапазоне спектра не могут быть гарантированы, и исследователям приходится довольствоваться результатами радиолокационных наблюдений, существенно уступающими оптическим по точности измерений орбитальных параметров.

Кодированием светового сигнала маяка через систему бортового опроса служебных систем можно контролировать работоспособность отдельных узлов и КА в целом независимо от телеметрических каналов.

Уже сейчас в некоторых областях ОКП находятся группировки спутников, различать которые позволяет только длительная история поведения всей группировки. Установка на борт оптических лазерных маяков с кодированным сигналом позволит оперативно и однозначно выделять нужный КА даже в очень тесной группировке. Эта функция оптических лазерных маяков будет особенно востребована при переходе на системы лазерной связи с узкой диаграммой направленности связного пучка света.

Еще один класс задач, который может быть разрешен с помощью оптических бортовых маяков, связан с предельно высокой точностью позиционных измерений. Проведение угловых и дистанционных измерений в оптическом диапазоне способно обеспечить точность на три порядка выше, чем при использовании радиодиапазона.

Проведена оценка точности измерения положения КА, по оптическим наблюдениям бортового оптического маяка, в зависимости от расстояния до КА (рисунок 6) для маяка непрерывного свечения и импульсного маяка с синхронизацией вспышек по времени.



время экспозиции телескопа –  $1/25$  с;  
 время мерцания импульсного маяка – 1 мс;  
 разрешающая способность телескопа –  $1''$

*Рисунок 6. Оценка точности измерения положения КА по оптическим наблюдениям бортового оптического маяка от расстояния до КА*

КА с маяком непрерывного свечения на низкой орбите со скоростью 8 км/с за время экспозиции ( $1/25$  сек) пролетит 300 метров, а на ГСО почти не сместится. Измерение положений импульсных маяков существенно повысит точность временной привязки измерений. То есть КА с импульсным маяком за 1 мсек (время мерцания оптического лазерного маяка) сместится всего на 8 метров на низкой орбите и совсем не сместится на ГСО.

Разработана математическая модель вычисления времени видимости маяка, для произвольного случая ориентации оптической оси маяка и оси вращения КА.

На рисунке 7 представлена схема моделирования времени видимости маяка, для произвольного случая ориентации оптической оси маяка и оси вращения КА.



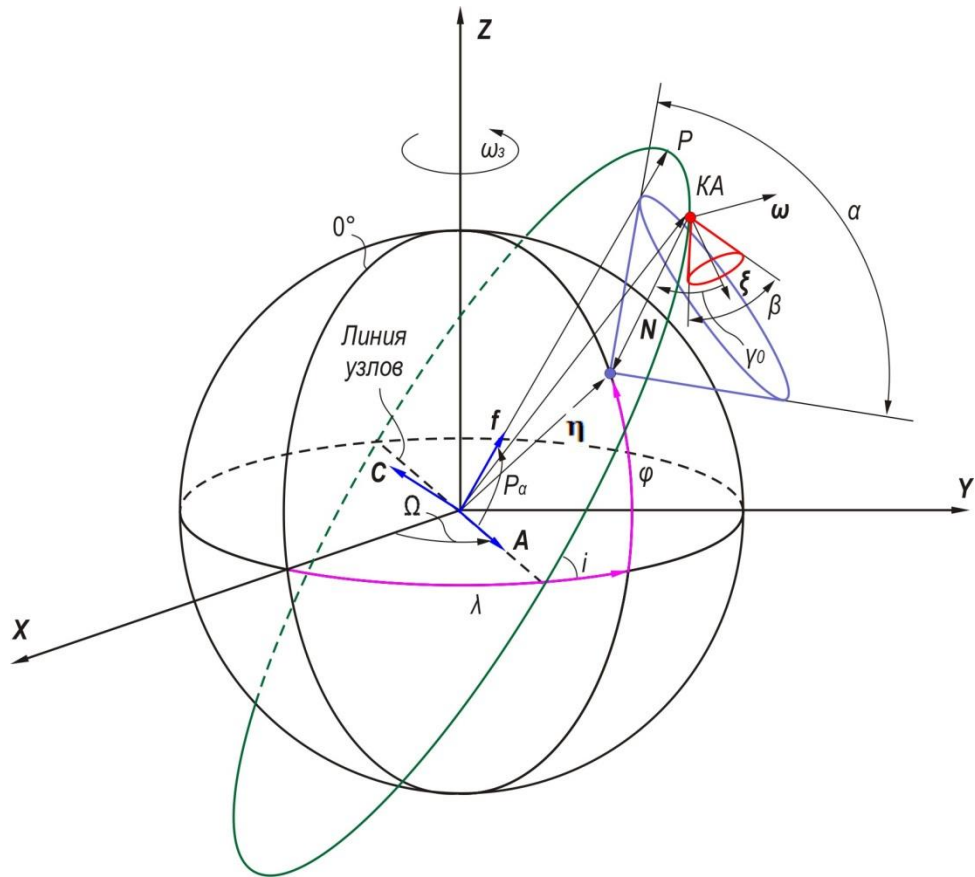


Рисунок 7. Схема для моделирования времени видимости маяка, для произвольного случая ориентации оптической оси маяка и оси вращения КА

Алгоритм моделирования времени видимости маяка:

1. В начальный момент времени КА находится в условном перицентре орбиты, положение которого можно менять заданием угла  $w$ .
2. Моделирование происходит по времени от  $t_0=0$  до  $t_k=nT$ , где  $T$  – период орбиты;  $n$  – количество витков.
3. Моделирование происходит с шагом  $\Delta t$ . За время  $\Delta t$  радиус-вектор КА повернется в плоскости орбиты на угол  $\Delta\vartheta$ . Зависимость  $\Delta\vartheta$  от  $\Delta t$  определяется через численное решение трансцендентного уравнения Кеплера.
4. Новое положение КА определяется по формуле  $\mathbf{r}_{i+1} = Q_6 \mathbf{r}_i Q_6^{-1}$ , где  $\mathbf{r}_i$  – радиус-вектор КА на предыдущей итерации;  $Q_6 = \left( \cos \frac{\Delta\vartheta}{2}, \mathbf{C} \sin \frac{\Delta\vartheta}{2} \right)$  – кватернион поворота вокруг вектора площадей на угол  $\Delta\vartheta$ .
5. За время  $\Delta t$  оптическая ось маяка повернется в новое положение, которое можно определить по формуле:  $\xi_{i+1} = Q_7 \xi_i Q_7^{-1}$ , где  $\xi_i$  – ориентация оптического маяка на предыдущей итерации;  $Q_7 = \left( \cos \frac{\Delta t \omega}{2}, \boldsymbol{\omega} \sin \frac{\Delta t \omega}{2} \right)$  – кватернион поворота вокруг оси вращения КА на угол  $\Delta t \omega$ .
6. Маяк считается видимым, если угол между вектором оптической оси  $\xi_{i+1}$  и вектором направления на телескоп  $\mathbf{N}_{i+1} = \boldsymbol{\eta} - \mathbf{r}_{i+1}$  (из маяка) меньше  $\beta/2$ .

Разработанная методика позволяет прогнозировать моменты видимости маяка при заданном положении оси вращения спутника. Всегда можно решить обратную задачу – по моментам наблюдения вспышек маяка выбрать модель, из которой можно будет определить ориентацию оси и период вращения.

Проведен анализ наземных оптических средств для наблюдения предлагаемых оптических лазерных маяков на КА.

Показаны возможности телескопов станций оптического наблюдения для регистрации сигналов автономных оптических маяков состояния высокоорбитальных и низкоорбитальных космических комплексов.

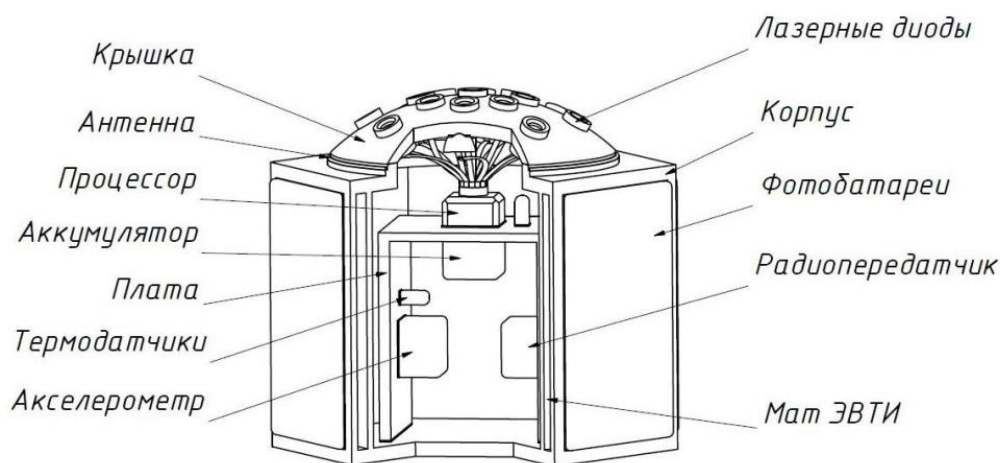
Разработана функциональная схема автономных оптических лазерных маяков (рисунок 8).



Рисунок 8. Функциональная схема автономных оптических лазерных маяков

Разработан проект конструкции автономного оптического маяка (рис. 9).

Используя 17 лазерных диодов с углом расходимости  $\sim 5^\circ$ , расположенных по принципу наибольшего перекрытия излучающей поверхности, достигаем значения порядка  $150^\circ$  телесного угла, излучаемого от оптического маяка в сторону системы наблюдения. Это позволяет нам с наибольшей вероятностью определить местоположение оптического маяка и его ориентацию. В случае выхода из строя одного лазерного диода, маяк не перестает полностью функционировать, тем самым увеличивается его надежность.



*Рисунок 9. Конструкция автономного оптического маяка*

Информация, посылаемая в пространство световыми сигналами оптических маяков, модулируется изменением спектра или амплитудой излучения, а также определенной системой комбинации этих вариантов. Рассмотрено несколько вариантов кодировки оптического лазерного маяка. Представленные варианты кодировки светового сигнала оптического лазерного маяка показывает широкий выбор таких режимов. Выбор конкретного варианта зависит от поставленной задачи – где будет находиться КА, и в каких режимах его состояние надо сигнализировать.

Проведена оценка эффективности лазерной локации космических аппаратов с применением оптических лазерных маяков.

Показано, что излучение оптического лазерного маяка, видимого через приемный телескоп наземного оптического лазерного дальномера, позволяет использовать его для точного наведения лазерного луча даже в тех случаях, когда уголкового отражателя расположен на неосвещенном космическом аппарате, например, находящемся в тени Земли или на неосвещенной стороне Луны. Точное знание направления на лоцируемый объект позволяет использовать зондирующий лазерный луч предельно малых угловых размеров, ограниченных только дифракционной расходимостью светового пучка на апертуре телескопа локатора. За счет этого мощность отраженного уголкового отражателем светового импульса возрастет в 100 раз.

Рассмотрена возможность использования системы наземных оптических лазерных маяков и космического дугомера-интерферометра для высокоточных наземно-космических исследований.

### ***ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ***

В результате исследований, проведенных в данной диссертационной работе, получены следующие результаты:

- Проведен системный анализ применения оптических маяков на основе лазерных диодов для локализации и идентификации лунных и околоземных КА.
- Разработана схема определения местоположения лунной посадочной станции с

- оптическим лазерным маяком с помощью бортовой телекамеры орбитального аппарата, которая позволит впервые сделать привязку координат маяка к звездам и центру масс Луны и использовать его в качестве астропункта для построения сетки селенодезических координат высокой точности.
- На основе проведенных исследований определены основные параметры и разработана конструкция оптического лазерного маяка для лунных посадочных станций «Луна-Глоб»/ «Луна-Ресурс-1».
  - Разработана математическая модель вычисления времени видимости оптических лазерных маяков на борту околоземных КА с помощью наземных оптических средств наблюдения.

### ***ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ***

1. Багров А.В., Вернигора Л.В., Вятлев П.А., Мартынов М.Б., Папченко Б.Н., Сысоев В.К. Создание светодиодных оптических маяков для космических аппаратов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2011. №4. С. 37-43.
2. Багров А.В., Вернигора Л.В., Мартынов М.Б., Сысоев В.К. Автономное сигнальное устройство // Патент №110857, RU 110857 U1, 2011.
3. Bagrov A.V., Vernigora L.V., Vyatlev P.A., Martynov M.B., Papchenko B.P., Sysoev V.K. Creation of Light Emitting Diode Optical Beacons for Spacecraft // Solar System Research. №7. 2012. P. 562–567.
4. Багров А.В., Барабанов А.А., Вернигора Л.В., Вятлев П.А., Мартынов М.Б., Пичхадзе К.М., Сысоев В.К. Применение лазерных диодных маяков для определения координат космических и наземных объектов // Космические исследования. 2013. Т. 51. №4. С. 1-9.
5. Горячев А.В., Смотряев С.А., Багров А.В., Вернигора Л.В., Сысоев В.К. «Особенности конструкции световых маяков для лунных посадочных станций» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина 2013. №2. С. 31-34.
6. Вернигора Л.В., Пичхадзе К.М., Сысоев В.К. Анализ параметров излучателя оптического маяка для системы навигации космических аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84553>